

Les composantes obscures de l'Univers: La relativité générale à l'épreuve des grandes échelles

Luc BLANCHET¹ & Benoit FAMAIEY²

¹ *GRECO, Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS UMR 7095,
Université Pierre & Marie Curie, 98^{bis} boulevard Arago, 75014 Paris, France*

² *Observatoire astronomique de Strasbourg, CNRS UMR 7550,
Université de Strasbourg, 11 rue de l'Université, 67000 Strasbourg, France*

La cosmologie moderne, l'une des héritières de notre théorie de la gravitation, la relativité générale, suppose l'existence dans l'Univers de grandes quantités de matière noire et d'énergie noire. Trouvera-t-on un jour la nature de ces deux composantes mystérieuses de l'Univers, ou bien reflètent-elles, au moins en partie, une limite à notre compréhension de la gravitation ?

1 L'avènement du modèle standard de la cosmologie

Dès le XIX^{ème} siècle, l'application de la loi de la gravitation universelle aux corps du système solaire donna lieu à des problèmes de “masse manquante”. En effet, les orbites d'Uranus et de Mercure étaient anormales, impliquant la présence éventuelle d'autres planètes non détectées jusqu'alors. Ces problèmes furent réglés de façon hybride, par une nouvelle planète dans le cas de l'orbite d'Uranus – Neptune, prédite en 1846 par Urbain Le Verrier et découverte dans la foulée – et *via* une modification de la loi de la gravitation dans le cas de Mercure – la relativité générale d'Einstein en 1915.

A la fin de la première moitié du XX^{ème} siècle, des problèmes relativement similaires de masse manquante commencèrent à se poser aux échelles galactiques et extra-galactiques. A ces échelles, le champ de gravitation est extrêmement faible, et les prédictions dynamiques de la relativité générale ne diffèrent guère de celles de la théorie newtonienne. En 1933, l'astronome suisse Fritz Zwicky ¹ mesura des vitesses très élevées pour quelques galaxies individuelles au sein de l'amas de galaxies de Coma. En tenant compte de ces vitesses, il calcula à partir des lois de Newton que la masse de l'amas devait être des centaines de fois plus importante que la masse visible. Autrement dit, il devait exister dans l'amas de la matière qu'on ne voit pas – une masse invisible –, mais qui devrait contribuer à sa dynamique. Il se trouve que la valeur qu'il avait obtenue pour le rapport entre masse totale de l'amas et masse de matière ordinaire était largement surestimée (notamment parce qu'une large partie de la masse manquante était sous la forme de gaz chaud n'émettant qu'en rayons X), mais ce problème de masse manquante n'a toujours pas entièrement disparu aujourd'hui.

Le problème soulevé par Zwicky ne fut néanmoins pas pris au sérieux pendant plusieurs décennies. La possibilité de la présence de grandes quantités de matière invisible aux échelles galactiques et au-delà revint en fait sur le devant de la scène tout d'abord à cause de considérations *théoriques*. En effet, les premières simulations numériques de disques galactiques en

rotation n'étant pas stables, les chercheurs américains Jeremiah Ostriker et Jim Peebles² proposèrent en 1973 que ces disques soient en fait entourés de grands halos sphériques de matière invisible permettant de stabiliser les disques en rotation: de la matière noire. Même si on se rendit compte une dizaine d'années plus tard que cet argument théorique n'était pas tout à fait correct, l'hypothèse d'Ostriker et Peebles fut entre-temps corroborée par la mesure de la vitesse de rotation du gaz dans les galaxies à grandes distances de leur centre (grâce à la raie à 21 cm de transition hyperfine dans l'hydrogène). Cette vitesse se révéla approximativement constante en fonction de la distance au centre, une découverte observationnelle simultanée des équipes des astronomes américaine Vera Rubin et français Albert Bosma à la fin des années 70.^{3,4} En effet, en l'absence de matière noire, la vitesse de rotation aurait dû décroître avec le rayon. Aujourd'hui, on a besoin de cette matière noire pour expliquer toute une série d'observations allant de l'échelle des galaxies jusqu'au fond diffus cosmologique (voir Annexe A).

Par ailleurs, la présence de ces quantités importantes de matière noire aux grandes échelles fut rapidement considérée comme permettant à l'Univers d'atteindre la densité critique d'énergie pour laquelle l'Univers est spatialement plat à grande échelle. La platitude de l'Univers était en effet naturelle dans le cadre de la théorie de l'inflation initiale de l'expansion (brève phase d'expansion accélérée au sortir de l'ère de Planck), proposée en particulier par Alan Guth au début des années 80 pour expliquer notamment l'homogénéité initiale de l'Univers. Ceci mena à un premier modèle "standard" de la cosmologie dans les années 80-90, pour lequel la densité totale de matière dans l'Univers était la densité critique, mais la fraction de matière ordinaire de l'ordre de seulement quelques pourcents.

Cependant, ce modèle fut rapidement confronté à des problèmes. Par exemple, la fraction de matière ordinaire observée dans les amas de galaxies était significativement plus importante que les quelques pourcents attendus. Ceci amena Jeremiah Ostriker et Paul Steinhardt⁵ à proposer en 1995 un nouveau modèle de la cosmologie, dominé par une *constante cosmologique*, identique à la constante proposée par Einstein en 1917 pour généraliser ses équations de la relativité générale. Ainsi la fraction de matière ordinaire pouvait rester de seulement quelques pourcents en terme d'énergie totale, dominée par la constante cosmologique, mais était bien plus importante qu'avant en terme de fraction de la matière.

Une prédiction importante d'un tel modèle avec constante cosmologique positive était une accélération de l'expansion de l'Univers, qui fut confirmée dès 1998 avec l'observation de supernovæ lointaines par les équipes de Brian Schmidt, Adam Riess et Saul Perlmutter, qui reçurent le prix Nobel en 2011 pour ces observations. La constante cosmologique, dont l'origine reste mystérieuse aujourd'hui, peut être assimilée à un fluide exotique avec une pression négative, donc qui "antigravite", et qui ne se dilue pas dans l'expansion de l'espace-temps. Ce fluide mystérieux est souvent appelé l'énergie noire, supposée n'avoir aucun lien avec la matière noire.

2 Les succès du modèle standard de la cosmologie

Telle est la situation en ce début de XXIème siècle: le modèle standard de la cosmologie décrit l'expansion de l'Univers à partir d'une phase d'inflation initiale suivie d'une phase d'expansion plus modérée, mais qui est en train de recommencer à accélérer sous l'effet de la constante cosmologique. Le contenu de l'Univers se répartit entre énergie noire (la constante cosmologique), matière noire, et matière ordinaire (les "baryons" dont nous-mêmes et toutes les étoiles sommes constitués). Les paramètres de ce modèle ont été progressivement précisés grâce à l'observation des grandes structures, et surtout par l'analyse récente des satellites WMAP et Planck du fond diffus cosmologique, la première lumière que nous recevons de l'Univers, émise 380 000 ans après le Big Bang (voir Annexe A).

On peut dire que les fluctuations de la température du fond diffus cosmologique et leur

ajustement par le modèle standard ont transformé la cosmologie en une science de précision. La hauteur des pics de fluctuations de température nous informe sans équivoque de la présence de matière noire aux échelles cosmologiques, se comportant comme un fluide de particules sans dissipation. De plus cette matière noire a façonné l'Univers tel que nous le connaissons actuellement. La formation des structures (amas de galaxies, grandes structures, *etc.*) dans ce modèle est réalisée grâce à l'attraction gravitationnelle engendrée par la matière noire. C'est l'un des grands succès du modèle standard que d'expliquer la formation et l'évolution des grandes structures observées dans l'Univers. Celles-ci forment une toile d'araignée avec des filaments gigantesques composés de milliers de galaxies, joints entre eux par des super-amas de galaxies et de gaz chaud. Ces grandes structures sont maintenant reproduites avec précision par des simulations numériques dans le cadre du modèle standard.

Le pourcentage mesuré de matière ordinaire par rapport à la matière noire est en accord avec la synthèse des éléments légers qui eut lieu quelques centaines de secondes après le Big Bang. A cet instant la température de l'Univers descend au-dessous du milliard de degrés et les protons et neutrons peuvent alors se combiner pour former des noyaux atomiques légers comme le deutérium et l'hélium. La synthèse de l'hélium dans l'Univers primitif et la prédiction du taux correct de production avaient constitué l'une des grandes confirmations du Big Bang avec la découverte du rayonnement cosmologique en 1965. Le modèle standard cosmologique a confirmé et étendu ces succès initiaux en prouvant la cohérence de la mesure du rapport entre matière noire et matière ordinaire avec les fluctuations du fond cosmologique.

Les décomptes du nombre de galaxies ont permis de mettre en évidence une autre prédiction du modèle standard: des ondes dans la distribution spatiale des galaxies, avec une longueur d'onde de l'ordre de 100 Mpc, qui ne sont autres que l'empreinte des oscillations acoustiques dans le plasma électron-proton primordial, et qui ont conduit aux fluctuations observées du fond diffus cosmologique. Ces ondes acoustiques baryoniques (appelées BAO) furent détectées pour la première fois en 1999.

Le modèle cosmologique possède une simplicité et une cohérence qui en font la base pour étudier de nombreux phénomènes importants, et il permet d'avoir un accès à la cosmologie primordiale comme la période de l'inflation. Il repose néanmoins sur un certain nombre d'hypothèses fortes:

- La relativité générale est valable à toutes les échelles (jusqu'à l'échelle de Planck);
- Nous n'occupons pas une place privilégiée dans l'Univers (principe dit "copernicien");
- Les effets de matière noire "cosmologique", nécessaire pour reproduire les fluctuations du fond diffus, et les effets à l'échelle des galaxies, pour reproduire les courbes de rotation, proviennent des mêmes causes;
- L'énergie noire est une entité distincte de la matière noire.

La validité de certaines de ces hypothèses pourrait, comme nous allons le voir, être remise en question.

3 Problèmes théoriques et observationnels dans le modèle standard

L'existence du secteur sombre (matière noire et énergie noire) révèle un problème de compatibilité entre la physique fondamentale connue et les observations cosmologiques. Aucune particule connue dans le cadre du modèle standard actuel de la physique des particules ne peut jouer le rôle de la particule de matière noire (voir Annexe B). L'extension de ce modèle standard de physique des particules pour rendre compte de l'existence de matière noire ne constitue néanmoins pas

un problème théorique *a priori*. Cependant, le vrai problème est qu'on cherche ces particules de matière noire depuis des années, et qu'on n'en a toujours pas détectées, malgré de nombreuses fausses alertes. Ni directement par des expériences en laboratoire – soit des capteurs de ces particules sur Terre soit des expériences de recherche sur les accélérateurs de particules – ni indirectement en Astronomie par des observations qui seraient expliquées par l'annihilation possible de la matière noire en d'autres particules. L'espace de paramètres des extensions naturelles du modèle standard de physique des particules se réduit donc de jour en jour, et l'absence persistante de détection de la matière noire engendrerait sur le long terme une crise profonde du domaine.

Le deuxième problème du modèle standard de la cosmologie est lié à la constante cosmologique. Celle-ci est ajoutée à la main dans les équations d'Einstein comme paramètre supplémentaire, et apparaît comme naturelle d'un point de vue relativiste. En fait, comme rien ne l'interdit, et qu'en physique on aime le “principe totalitaire” selon lequel tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire, la constante cosmologique doit bien, en principe, être incluse dans notre description du champ gravitationnel. Il suffit de vérifier qu'elle reste compatible avec les tests de la relativité générale dans le système solaire et les pulsars binaires. Mais là n'est pas le problème. En effet la valeur *mesurée* de la constante cosmologique est extrêmement petite, elle vaut environ 10^{-123} en unités de Planck. Le problème intervient lorsque l'on essaie de comprendre cette valeur en utilisant la théorie quantique des champs. Comme l'a montré Andreï Sakharov en 1968 (*le Sakharov des droits de l'homme*), l'énergie des fluctuations quantiques du vide en théorie des champs prend nécessairement la forme d'une constante cosmologique. C'est pourquoi cette constante est souvent assimilée à l'énergie du vide. En théorie des champs, quand on cherche à décrire des systèmes microscopiques, on ignore généralement l'énergie du vide car on ne s'intéresse qu'à des différences d'énergie et que celle-ci disparaît dans la différence. Mais en relativité générale, d'après le principe d'équivalence, toutes les formes d'énergies sont la source du champ gravitationnel. L'énergie du vide n'est qu'une forme d'énergie particulière et il faut donc la mettre dans les équations d'Einstein au même titre que les autres formes d'énergie. On doit alors imaginer que tous les champs présents dans l'Univers contribuent à cette énergie du vide. Lorsque l'on fait le calcul de l'énergie du vide pour un champ donné, on trouve une valeur gigantesque, qui n'a rien à voir avec la minuscule valeur observée. Et en plus il faut additionner toutes les contributions de tous les champs connus, ce qui donne une valeur encore plus titanesque. Ce résultat manifestement absurde a été appelé la prédiction la plus fausse de toute l'histoire de la physique théorique! La nécessité de devoir compenser itérativement l'énergie du vide pour la rendre finalement minuscule sans l'annuler totalement est ce qu'on appelle un problème “d'ajustement fin” (*fine-tuning*). Par ailleurs, le fait que les densités d'énergie noire, de matière noire et de matière ordinaire soient, à peu de choses près, du même ordre de grandeur aujourd'hui, n'est pas non plus compris: c'est un problème dit “de coïncidence”, qui pourrait pointer vers une physique plus complexe que supposée dans le modèle standard.

En plus des problèmes théoriques précédents, le modèle standard est aussi confronté à des problèmes observationnels, principalement à l'échelle des galaxies. En supposant que l'on peut extrapoler le modèle depuis l'échelle cosmologique, où il marche fort bien, jusqu'aux échelles galactiques grâce aux simulations numériques, de nombreux problèmes apparaissent. Par exemple, on ne comprend absolument pas les propriétés internes et la distribution des galaxies satellites orbitant autour des grandes galaxies spirales du Groupe Local, notre Voie Lactée et la galaxie d'Andromède.⁶ De plus, dans toutes les galaxies spirales, on observe une forte corrélation entre la distribution de matière ordinaire et le champ gravitationnel déduit de la courbe de rotation des galaxies, alors que l'on s'attendrait plutôt *a priori* à une corrélation entre la distribution de matière noire et le champ gravitationnel, puisque la matière noire est censée dominer la masse des galaxies. Plus précisément, si on ignore la matière ordinaire, négligeable dans un certain nombre de petites galaxies, un halo de matière noire de masse donnée devrait toujours engendrer le même profil de courbe de rotation. Or on observe une grande diversité de profils de courbes

de rotation⁷ à masse totale donnée (voir Figure 1). Dans le cadre standard, cette diversité peut *a priori* s'expliquer si les effets produits par exemple par les explosions de supernovæ déplacent de grandes quantités de matière ordinaire dont l'effet gravitationnel modifie alors le profil de matière noire. C'est ce qu'on appelle un mécanisme de rétroaction (*feedback*). Des effets de rétroaction différents selon les galaxies peuvent alors expliquer la diversité des profils à masse totale donnée. Mais comment alors expliquer l'*uniformité*⁸ de ces profils en fonction de la distribution de matière ordinaire? Cela nécessite un ajustement fin des paramètres de rétroaction (par exemple, les mécanismes de rétroaction internes doivent finement balancer les effets liés à l'environnement et à l'histoire des collisions et fusions mineures et majeures de chaque galaxie) – ajustement fin qui n'est pas du tout compris aujourd'hui dans le cadre standard.

A contrario, si on suppose que l'effet que l'on attribue à la matière noire est en fait dû à une modification effective de la gravitation à l'échelle des galaxies, qui impliquerait l'existence d'une nouvelle constante sous la forme d'une accélération caractéristique, alors tout s'explique (voir Figure 1). Bien sûr ceci reste très spéculatif en l'absence d'une façon précise pour mettre en œuvre une telle constante dans les lois de la nature, particulièrement la loi gravitationnelle. Mais il se trouve qu'il existe une formule simple proposée par le physicien israélien Mordehai Milgrom en 1983^{9,10,11} (connue sous le nom de MOND – M^Odified Newtonian Dynamics) qui modifie la loi de la gravitation newtonienne pour des champs très faibles, en deçà d'une accélération caractéristique (voir Annexe C). Autrement dit, avec cette loi, pour les accélérations très faibles, la gravitation peut devenir beaucoup plus intense que celle de Newton. Cette formule est extrêmement prédictive et marche remarquablement bien pour reproduire toutes les observations connues sur la matière noire au niveau des galaxies.⁸ Mystérieusement, la valeur mesurée de la constante d'accélération est très proche de la valeur associée à la constante cosmologique, montrant qu'il existe peut-être un lien entre l'énergie noire et les effets que l'on attribue généralement à la matière noire.

Malheureusement, la formule MOND a ses propres problèmes car elle ne fonctionne pas partout, loin de là: malgré son incroyable efficacité dans les galaxies, elle échoue à plus grande échelle pour décrire les amas de galaxies.^{12,13} Elle est aussi mise à l'épreuve à petite échelle pour expliquer les mouvements des étoiles dans certains petits amas stellaires. En outre, elle n'est pas utilisable en cosmologie. Enfin, à l'échelle du système solaire, certaines transitions entre les régimes de forte et faible accélération ne sont pas permises par les mouvements planétaires, même si d'autres restent parfaitement acceptables¹⁴.

4 Alternatives au modèle standard et théories de gravitation modifiée

Face à ces problèmes théoriques et observationnels du modèle standard de la cosmologie, de nombreuses alternatives sont considérées par la communauté. Comme le modèle repose sur l'hypothèse de la validité de la relativité générale, il est naturel de considérer des théories de la gravitation modifiées. Ces dernières années on a assisté à une floraison impressionnante de telles théories.

Il y a tout d'abord les théories qui cherchent à interpréter l'énergie noire – une simple constante cosmologique dans le modèle standard – par un champ fondamental nouveau. Ce champ est généralement baptisé “quintessence”, car il peut être vu comme une cinquième interaction fondamentale se rajoutant aux quatre forces connues (gravitation, électromagnétisme, interactions forte et faible). Dans ce cas, la gravitation modifiée consiste à rajouter au champ tensoriel habituel de la relativité générale – le champ qui représente la métrique, l'objet mathématique qui fixe les distances dans l'espace-temps – un champ scalaire de quintessence. C'est pourquoi on nomme cette extension de la relativité générale une théorie “tenseur-scalaire”.

Les théories tenseur-scalaire sont testables expérimentalement, car dans ce cadre, l'énergie

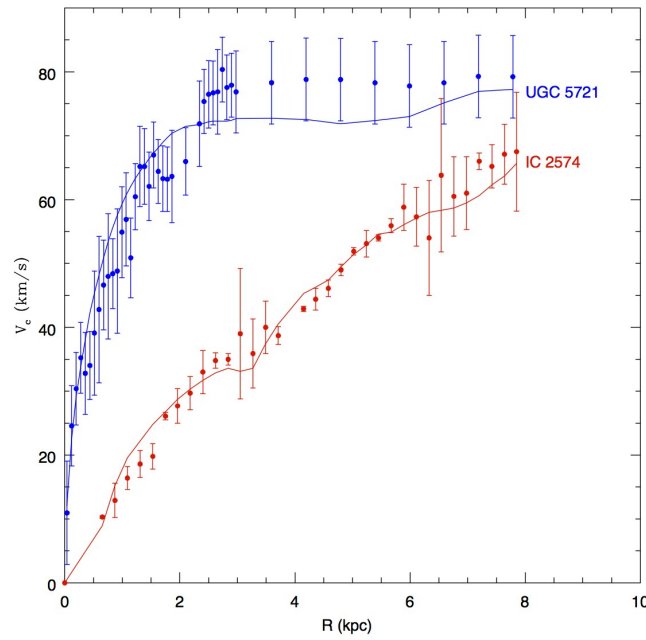


Figure 1: Courbes de rotation, c'est-à-dire vitesse circulaire du gaz (en km/s) en fonction du rayon (en kpc), dans les galaxies UGC 5721 et IC 2574 (les points indiquent les mesures de la vitesse accompagnées de leurs barres d'erreur): ces deux galaxies ont quasiment la même masse totale de matière noire, mais leur *distribution* de matière ordinaire (gaz et étoiles) diffère. Dans le modèle standard, on s'attendrait *a priori* à ce que les formes des courbes de rotation soient à peu de choses près les mêmes. Or ce n'est pas du tout le cas. La prédiction de MOND pour ces courbes de rotation est quant à elle représentée en lignes continues: la forme des courbes de rotation est parfaitement prédite dans le paradigme MOND.

noire n'est plus une simple constante cosmologique, mais un champ qui varie avec l'espace et le temps. Ainsi, à partir de 2020, le satellite européen Euclid pourra vérifier, en évaluant précisément le taux d'expansion de l'Univers en fonction du temps, si celui-ci est compatible avec une constante cosmologique ou avec un champ de quintessence. Une autre classe de modèles très en vogue actuellement sont les théories dites " $f(R)$ ", qui remplacent le terme de scalaire de courbure " R " de l'action d'Einstein-Hilbert de la relativité générale par une fonction de celui-ci supposée être contrainte par les observations cosmologiques.

Un problème important avec les champs scalaires utilisés pour décrire l'énergie noire est de satisfaire les contraintes observationnelles dans le système solaire et les pulsars binaires, donc dans les régions où il y a sur-densité de la matière ordinaire par rapport à la densité moyenne cosmologique. En effet, l'analyse précise de la trajectoire des sondes spatiales et des planètes dans le système solaire, ainsi que le chronométrage des pulsars binaires restreint les théories de ce type. Une théorie tenseur-scalaire particulière a été inventée pour s'affranchir des contraintes dans le système solaire. Le champ scalaire s'appelle le "caméléon" car il s'adapte et se camoufle comme un caméléon dans certains environnements comme le système solaire où il devient indétectable.¹⁵ L'imagination créatrice des théoriciens est sans limite!

Un autre type de théorie de gravitation modifiée est sous les feux de la rampe depuis quelques années. Dans sa formulation géométrique, la relativité générale est interprétée comme résultant d'une déformation de l'espace-temps, mais on peut aussi voir la force gravitationnelle comme étant associée à l'échange d'une particule, le graviton. En relativité générale, le graviton a une masse rigoureusement nulle (comme le photon qui a aussi une masse nulle, mais un spin égal à 1 alors que le graviton a un spin 2). Dans les années 1930, les physiciens suisse Markus Fierz et autrichien Wolfgang Pauli ont cherché à savoir s'il serait possible que, dans le cadre d'une extension de la relativité générale, la force gravitationnelle soit véhiculée par un graviton massif.

La réponse à cette question a subi des vicissitudes jusqu’au début des années 2010 quand l’équipe de la physicienne suisse Claudia de Rham, de l’université Case Western Reserve à Cleveland, a proposé une extension de la gravitation avec un graviton massif.¹⁶ Contrairement aux théories précédentes du même type, qui contenaient des états d’excitation instables appelés “fantômes” qui rendent la théorie inexploitable (et ont tendance à proliférer dans les théories alternatives), il s’agit d’une “bonne” théorie. De plus, cette théorie peut être étendue à une théorie dite “bimétrique”, dans laquelle il y a un graviton massif et un graviton sans masse, et qui représente l’unique extension de la relativité générale avec deux métriques et, bien sûr, sans fantômes. Pour tenter de se représenter une telle théorie, on peut imaginer qu’aux deux gravitons sont associés deux espace-temps superposés décrits chacun par une métrique différente. On pourrait avoir de la matière ordinaire dans l’un des deux espace-temps et une matière “exotique” dans l’autre espace-temps, ce qui se traduirait par de nouvelles propriétés pour le mouvement de la matière exotique tel que mesuré dans l’espace-temps ordinaire.

En quoi cette théorie de la gravitation massive pourrait-elle résoudre les problèmes cosmologiques? Dans cette théorie, la masse du graviton pourrait être associée à une constante cosmologique de sorte qu’on espère que cette masse donnerait la valeur de l’énergie noire. Il devrait ainsi être plus facile de résoudre le problème de la valeur incroyablement petite mais non nulle de la constante cosmologique. Comme la gravitation massive est une théorie récente, ses prédictions n’ont pas encore été totalement éclaircies. On ignore si la cosmologie est totalement satisfaisante dans le cadre de cette théorie.

D’autres théories de la gravitation modifiée sont motivées quant à elles par le problème de la matière noire. Elles ont l’ambition de retrouver la formule MOND qui décrit si bien le champ gravitationnel attribué à la matière noire dans les galaxies. En effet, rappelons que cette formule ne constitue pas à proprement parler une théorie (en particulier elle n’est pas relativiste), mais représente une loi empirique dont on constate qu’elle marche extrêmement bien dans un certain régime, mais qu’on ne comprend pas en termes de physique fondamentale.

L’idée des théories inspirées par MOND consiste en général à rajouter des champs nouveaux au champ métrique de la relativité générale (champs scalaires et vectoriels) de façon à n’avoir plus besoin de matière noire. En particulier, la théorie relativiste dite TeVeS pour “tenseur-vecteur-scalaire”, développée par les physiciens israélien Jacob Bekenstein et américain Bob Sanders,^{17,18} a joué un rôle de pionnier dans ce domaine. De nombreuses autres théories ont été proposées depuis lors, mais la plupart sont compliquées et toutes contiennent une fonction arbitraire mise à la main dans l’“action” de la théorie – ce qui n’est pas très satisfaisant. De plus certaines de ces théories sont de vraies maisons hantées car remplies de fantômes! Enfin toutes ces théories, qui sont sans matière noire, ont beaucoup de difficultés à reproduire les observations des fluctuations du fond diffus cosmologique mesurées par le satellite Planck.

Peut-être que ces théories pâtissent d’un fort préjudice théorique, qui est en fait ancré dans l’esprit original de MOND: trouver une théorie parfaite de gravitation modifiée sans matière noire, valable à toutes les échelles. Mais après tout, les observations montrent clairement la présence d’un nouveau degré de liberté se comportant comme un fluide sans dissipation aux grandes échelles, donc comme de la matière noire. D’un autre côté, il y a *dans les données* aux échelles galactiques quelque chose qui ressemble à une loi nouvelle – peut-être un mécanisme de gravité modifiée.

Une théorie hybride (sans préjudice), avec de la matière noire se couplant à une physique gravitationnelle modifiée, pourrait-elle alors rendre compte de toutes les observations connues? Dans cet esprit une forme nouvelle de matière noire a été proposée. Cette matière noire est fondée sur une analogie avec la physique des matériaux diélectriques en électrostatique. Dans un matériau diélectrique, les atomes se comportent comme des dipôles électriques, qui se polarisent en présence d’un champ électrique extérieur: ils s’orientent suivant le champ et deviennent eux-

mêmes la source d'un nouveau champ électrique. Le champ total est alors la somme du champ extérieur et du champ induit par la polarisation des atomes. Remarquablement, il se trouve que MOND apparaît comme une sorte d'analogue gravitationnel au phénomène de polarisation. Dans le cas gravitationnel, la polarisation entraîne l'augmentation de la force de gravitation, d'où la proposition d'un nouveau type de matière noire qui est décrite par sa masse et est munie d'un moment dipolaire "gravitationnel" – l'analogue gravitationnel du moment dipolaire électrique. La phénoménologie de cette matière noire est alors exactement la même que celle de MOND.

Très récemment, cette idée a conduit à plusieurs théories relativistes de matière noire "dipolaire". L'avantage dans ce type de théories, est que comme il y a de la matière noire on peut espérer être en accord avec les observations cosmologiques. Dans la dernière version de ces théories, proposée par l'un de nous (L.B.) avec Lavinia Heisenberg, de l'université de Zurich,¹⁹ la gravitation est aussi modifiée et se place dans le cadre bien posé (sans fantômes) des théories "bimétriques" de la gravité massive mentionnées précédemment. Il s'agit donc d'une théorie hybride qui suppose la présence d'une matière noire particulière (de nature dipolaire) couplée à une extension de la relativité générale. Une telle théorie pourrait résoudre à la fois le problème de l'énergie noire par la gravité modifiée, et celui de la matière noire par des particules de type dipolaire se comportant comme un fluide sans dissipation à l'échelle du fond diffus cosmologique, et reproduisant MOND aux échelles galactiques.

Toutes ces théories reflètent une recherche tout à fait pertinente dans l'état actuel de nos connaissances, et étant donnés les résultats expérimentaux et observationnels dont nous disposons à ce jour. Mais si par exemple on découvrait des particules de matière noire "normale" (WIMP, neutrinos stériles, *etc.*) par des expériences sur Terre (dans des capteurs ou avec les accélérateurs de particules comme le LHC), il est probable que tout ce champ de recherche de même que l'idée générale de MOND seraient sérieusement à remettre en cause. Il resterait néanmoins à comprendre pourquoi matière noire et matière ordinaire conspirent à l'échelle des galaxies de façon à reproduire la phénoménologie de MOND, qui est un simple fait observationnel qu'il nous faut comprendre, quel que soit le cadre théorique.

5 Conclusion

Nous disposons aujourd'hui d'un excellent modèle standard de la cosmologie, qui décrit l'Univers aux grandes échelles avec une très grande précision, mais qui n'explique pas l'origine et la nature des constituants fondamentaux de l'Univers (matière noire et énergie noire), et qui n'est pas encore capable d'expliquer les observations de la dynamique des galaxies. Ce dernier point est souvent considéré comme potentiellement soluble par une meilleure prise en compte de la physique complexe de la matière ordinaire dans les simulations de formation des galaxies. Il est néanmoins probable que ces problèmes vont persister, car ils font peut-être poindre une physique fondamentale plus complexe de la matière noire, couplée à d'éventuelles modifications de la relativité générale, et qui pourrait également illuminer d'un jour nouveau le problème de l'énergie noire. Il reste qu'aujourd'hui les modèles alternatifs que nous avons évoqués ne peuvent pas véritablement rivaliser avec le modèle standard. Ils doivent avant tout être validés par une physique plus fondamentale avant de pouvoir faire des prédictions nouvelles, éventuellement hors du contexte cosmologique. Les années à venir seront, quoi qu'il en soit, passionnantes.

A Le fond diffus cosmologique

Le fond diffus cosmologique est un rayonnement fossile, vestige de l'époque dense et chaude qu'a connue l'Univers dans le passé juste après le Big Bang, découvert fortuitement par Arno

Penzias et Robert Wilson en 1965. Lorsque les protons et les électrons se sont recombinés pour former les premiers atomes, 380 000 ans après le Big Bang, les photons ont été libérés et se sont propagés jusqu'à nous. Les fluctuations du fond diffus cosmologique, qui correspondent aux variations de densité initiales de l'Univers à cette époque ont été détectées en 1992, et constituent une mine d'informations extraordinaire sur l'état de l'Univers au moment où le rayonnement a été émis. Ces fluctuations sont les "graines" qui engendrent les grandes structures de l'Univers et plus tard les galaxies. Une découverte plus récente a montré que l'on peut retrouver ces graines sous la forme d'ondes de densité dans la distribution spatiale des galaxies. La matière noire est indispensable pour expliquer tant l'amplitude des fluctuations elles-mêmes que la formation et l'évolution des grandes structures, car c'est elle qui déclenche et amplifie l'effondrement gravitationnel de la matière ordinaire. Le spectre complet des fluctuations du fond diffus cosmologique est parfaitement expliqué par le modèle cosmologique standard, comme les résultats récents du satellite Planck l'ont confirmé. L'ajustement de ce modèle aux observations implique un Univers composé aujourd'hui de 68% d'énergie noire, de 27% de matière noire et – seulement – de 5% de matière ordinaire. Même si énergie noire et matière noire sont à ce stade des mots pour ce que nous ne comprenons pas encore !

B A la recherche des particules de matière noire

Les particules connues actuellement en physique des particules ne peuvent pas être la particule de matière noire. Mais lorsque l'on examine des extensions du modèle actuel de la physique des particules, les candidats à la matière noire ne manquent pas ! Le meilleur est le WIMP (Weakly Interacting Massive Particle), une particule massive qui n'interagit avec la matière ordinaire que *via* l'interaction faible. La particule stable la plus légère dans le cadre d'une extension supersymétrique du modèle des particules est un WIMP appelé neutralino. D'autres candidats intéressants sont l'axion, une particule invoquée pour résoudre certains problèmes de physique des particules (n'ayant *a priori* rien à voir avec le problème de la matière noire), les neutrinos stériles qui seraient similaires aux neutrinos du modèle standard mais sans interactions faibles et avec des masses plus élevées, et les particules de Kaluza-Klein qui seraient des états excités des particules du modèle standard dans des théories ayant des dimensions d'espace supplémentaires. Toutes ces particules candidates pour la matière noire sont recherchées activement, mais aucune n'a été détectée à ce jour.

C MOND

La formule MOND postule une modification de la loi de Newton dans un régime de champs de gravitation plus faibles qu'une certaine échelle d'accélération caractéristique a_0 . Elle a été proposée par Moti Milgrom ^{9,10,11} il y a plus de 30 ans, et a permis de prédire la mystérieuse corrélation observée entre champ gravitationnel et matière ordinaire dans les galaxies (loi de Milgrom). L'idée est simplement que si l'accélération gravitationnelle est $g < a_0$, la loi de Newton $g = GM/r^2$ est alors remplacée par $g = \sqrt{GMa_0}/r$. Cette modification simple produit automatiquement des courbes de rotation plates pour les galaxies, rend compte de la loi empirique (dite de Tully-Fisher) reliant la masse de matière ordinaire des galaxies à leur vitesse de rotation, et prédit une échelle caractéristique de densité de surface maximale pour les disques galactiques. La constante d'accélération a_0 est mesurée par l'ajustement de la formule aux observations des courbes de rotation des galaxies. Elle vaut environ 10^{-10} m/s^2 , et est de l'ordre de la racine carrée de la constante cosmologique en unités naturelles. La formule MOND paraît bien étrange et "osée", mais plus de 30 ans de recherches ont confirmé sa valeur pour expliquer tout un ensemble d'observations aux échelles galactiques. Un nombre croissant d'astrophysiciens pensent qu'elle constitue la clef du problème de la matière noire, au moins à l'échelle des galaxies.

References

1. F. Zwicky. Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln. *Helv. Phys. Acta*, 6:110, 1933.
2. J. P. Ostriker and P. J. E. Peebles. A numerical study of the stability of flattened galaxies: or, can cold galaxies survive? *Astrophys. J.*, 186:467, 1973.
3. V.C. Rubin, W.K. Ford, and N. Thonnard. Rotational properties of 21 sc galaxies. *Astrophys. J.*, 238:471, 1980.
4. A. Bosma. 21-cm line studies of spiral galaxies. ii. the distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types. *Astron. J.*, 86:1825, 1981.
5. J. P. Ostriker and P. J. Steinhardt. Cosmic concordance. *Nature*, 377:600, 1995.
6. M. S. Pawlowski, B. Famaey, D. Merritt, and P. Kroupa. On the persistence of two small-scale problems in Λ CDM. *Astrophys. J.*, 815:id.19, 2015.
7. K. A. Oman, J. F. Navarro, A. Fattahi, C. S. Frenk, T. Sawala, and S. D. M. White *et al.* The unexpected diversity of dwarf galaxy rotation curves. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 452:3650, 2015.
8. B. Famaey and S. McGaugh. Modified Newtonian dynamics (MOND): Observational phenomenology and relativistic extensions. *Living Rev. Rel.*, 15:10, 2012.
9. M. Milgrom. A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. *Astrophys. J.*, 270:365, 1983.
10. M. Milgrom. A modification of the Newtonian dynamics: Implications for galaxies. *Astrophys. J.*, 270:371, 1983.
11. M. Milgrom. A modification of the Newtonian dynamics: Implications for galaxy systems. *Astrophys. J.*, 270:384, 1983.
12. D. Gerbal, F. Durret, M. Lachièze-Rey, and G. Lima-Neto. Analysis of x-ray galaxy clusters in the framework of modified newtonian dynamics. *Astron. Astrophys.*, 262:395, 1992.
13. D. Clowe, M. Bradac, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones, and D. Zaritsky. A direct empirical proof of the existence of dark matter. *Astrophys. J.*, 648:L109, 2006.
14. A. Hees, B. Famaey, G. W. Angus, and G. Gentile. Combined solar system and rotation curve constraints on MOND. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 455:449, 2016.
15. J. Khoury and A. Weltman. Chameleon fields: Awaiting surprises for tests of gravity in space. *Phys. Rev. Lett.*, 93:171104, 2004.
16. C. de Rham, G. Gabadadze, and A.J. Tolley. Resummation of Massive Gravity. *Phys. Rev. Lett.*, 106:231101, 2011.
17. J.D. Bekenstein. Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm. *Phys. Rev. D*, 70:083509, 2004.
18. R.H. Sanders. A tensor-vector-scalar framework for modified dynamics and cosmic dark matter. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 363:459, 2005.
19. L. Blanchet and L. Heisenberg. Dipolar Dark Matter with Massive Bigravity. *J. Cosmo. Astropart.*, 12:026, 2015.